

KTX 시운전시 고속철도 교량의 성능검증

Performance Verification for High Speed Railway Bridge on Test Operation of KTX

나 성 훈*
Na, Sung-Hoon

양 신 추**
Yang, Sin-chu

이 지 하***
Lee, Jee-Ha

손 기 준****
Son, Ki-Jun

ABSTRACT

The railway bridges on the new high-speed line are the first structures designed and constructed by our local engineers for high-speed running. In securing running stability and riding comfort in high-speed running, it is very important to verify the performance of structures and local specifications and design criteria by measuring and analyzing the dynamic behavior of main structural members.

In this study, 4 different types(simple-span, 2, 3, 4-continuous spans) of PCS Box bridges on the test line(Yongwa~Simok section) were selected, each representing a different type of superstructures, in order to verify the performance of the bridges by measuring dynamic responses during the test-run of KTX. Reviews of the running stability and the riding comfort were carried out with the results of the measurement and the analyses of vibration acceleration, endrotation, distortion and deflection at midspan.

1. 서론

고속철도구간에 부설된 고가구조물들은 국내기술진에 의해 설계·시공된 최초의 고속철도용 구조물로서, 열차가 고속주행시 구조물의 중요 구조부재에 발생하는 동적거동을 계측·분석하여 국내의 각종 설계 및 시방기준을 검증하는 것은 열차의 주행안전성 및 승객의 승차감 확보 측면에서도 매우 중요한 일이다.

따라서 본 연구에서는 고속철도 시험선구간에 부설되어 있는 PSC BOX 교량구조물 중에서 상부구조형식별(단경간, 2, 3, 4경간 연속구간)로 4개의 교량구조물을 선정하여 KTX차량 시험주행시 동적응답을 측정하고, 열차의 주행안전성 및 승차감의 확보 관련 항목인 진동가속도, 단부꺾임각, 처짐, 면틀림 등에 대하여 분석하였다.

2. 시험대상 교량구조물

시험선구간내의 고가구조물 중에서 상부구조형식에서 가장 대표성이 있는 단경간 구간(공현2교, 1@40), 2경간 연속구간(공현2교, 2@40), 3경간 연속구간(갈원교, 3@40), 4경간 연속구간(갈원교, 4@40)등으로 연속지지 형식을 달리하여 성능시험 대상구조물을 선정하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

**** 한국고속철도건설공단 중부시설관리단, 비회원


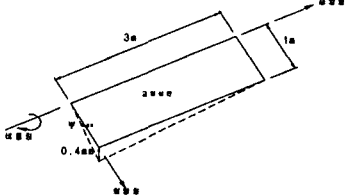
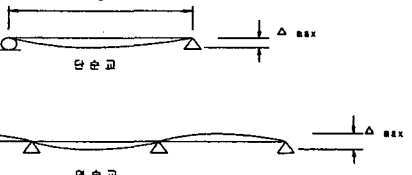
도표 1. 시험대상 교량 및 측정횟수

상부구조형식		측정횟수	속도(km/hr)	비고
PSC BOX	단경간 구간(궁현2교, 1@40)	18	44 ~ 252	
	2경간 연속구간(궁현2교, 2@40)	8	99 ~ 191	
	3경간 연속구간(갈원교, 3@40)	8	98 ~ 176	
	4경간 연속구간(갈원교, 4@40)	18	148 ~ 293	

3. 시험결과분석 항목 및 평가방법

열차가 고속으로 주행시 고속철도 교량구조물의 성능확보 여부를 검토하기 위해 선로건설기준(한국고속철도건설공단, 1998)에 따른 시험항목 및 평가기준은 도표 2와 같다.

도표 2. 시험항목 및 평가기준

배경	시험항목 및 평가기준	비고
열차 운행 안전성 확보	· 상판 최대 연직가속도 $\leq 0.35g$	
	· 상판의 최대 상대꺾임각(단부꺾임각) $\leq 50 \times 10^{-5} \text{ rad}$	
	· 상판의 단위 길이당 최대 횡방향 비틀림(면틀림) $\leq 0.4\text{mm/m(횡)}/3\text{m(중)}$ 또는 $\leq 0.0004 \text{ rad}/3\text{m(중)}$	
승차감 확보	· 최대처짐(중양부) $\leq L/1700$	

4. 교량구조물의 성능시험

4.1 시험방법

교량구조물의 시험방법은 변위 및 진동이 비교적 크게 발생할 것으로 예상되는 부위를 측정지점으로 선택하여 센서를 부착한 후 고속열차가 무작위 주행할 때 실시하였다. 이때 측정지점에 발생하는 처짐 및 가속도 등을 측정하여 구조물의 동적거동상태를 파악하였다.

4.2 시험열차 제원

시험선 구간에 대한 KTX 차량의 주행시험은 시험선구간중 건설이 완료된 용와~시목(KPR 89.2km~140.2km)구간에서 KTX-02호, KTX-03, KTX-05 차량이 각각 20량, 16량, 16량으로 편성되어 시험운행 되었다.

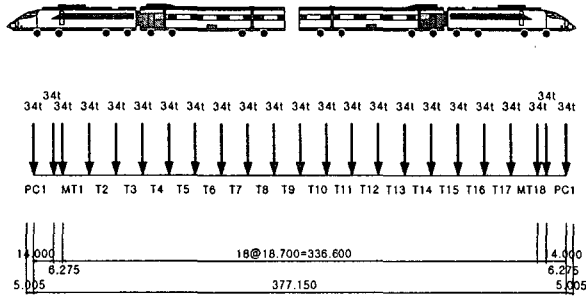


그림1. KTX 활하중모형(대차중량 및 축간간격)

4.3 시험대상 교량구조물 센서배치도

대상구조물에 설치할 센서종류 및 센서배치도는 각종 설계기준을 검증하고 구조물의 안전성과 사용성을 확인할 수 있도록 선정 또는 배치하였으며, 각 시험대상 중에 4경간 연속구간(갈원교)에 대한 센서부착 현황 및 센서배치도는 그림2.와 같다.

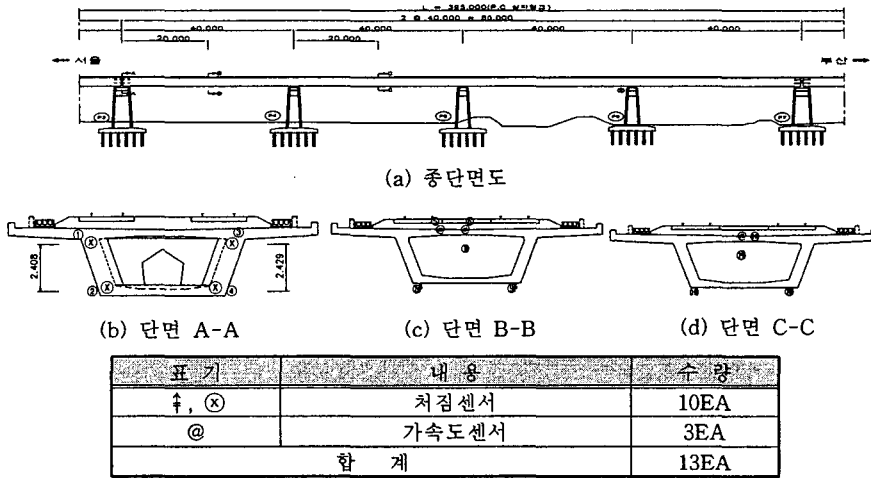


그림2. PSX BOX 4경간 연속구간(갈원교) 센서부착위치

4.4 시험항목별 성능시험결과

고속철도 시험선구간에 부설되어 있는 PSC BOX 교량구조물 중에서 상부구조형식별(단경간, 2경간, 3경간, 4경간)로 4개의 교량구조물을 선정하여 KTX차량의 시험주행시 교량의 동적응답을 측정하였는데, 그 중에서 4경간 연속구간에 대해서만 측정분석결과를 나타내었다.

(1) 상판가속도

PSC BOX의 형식중 4경간 연속구간에 대한 KTX(KTX-5)주행시 발생하는 진동가속도를 측정 한 결과 최대 진동가속도가 선로건설기준 허용치인 0.35g보다 작은 0.097g(내측경간, Acc 5, 서울→부산 217km/hr)로 확인되었다.

주행속도 따른 각 센서별 최대 진동가속도 절대값은 그림3.과 같고, 진동가속도 이력곡선의 일례는 그림4.와 같다.

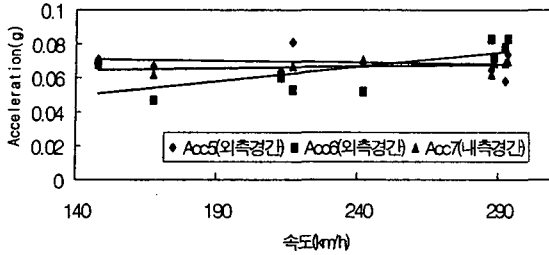


그림3. 주행속도별 최대 진동가속도

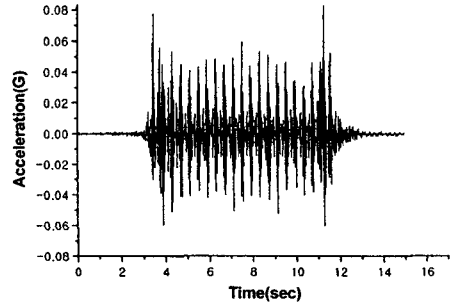


그림4. 진동가속도 이력곡선의 일례

(2) 상판의 단부꺾임각

PSC BOX 형식중 4경간 연속구간에 대해 경간 단부에 교축방향으로 설치된 변위계로부터 얻어진 상대변위량을 이용하여 단부꺾임각을 환산한 결과 최대값이 선로건설기준 허용치인 50×10^{-5} rad 보다 작은 10.640×10^{-5} rad (Dis 1~Dis 2, 서울→부산 289km/hr)인 것으로 확인되었다.

주행속도 따른 각 센서별 단부꺾임각의 최대값은 그림5.와 같고, 단부꺾임각에 대한 이력곡선의 일례는 그림6.과 같다.

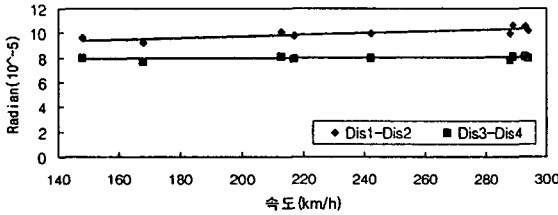


그림5. 주행속도별 단부꺾임각

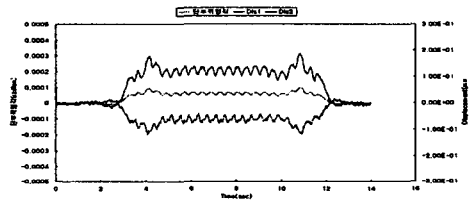


그림6. 단부꺾임각에 대한 이력곡선의 일례

(3) 중앙부 처짐

4경간 연속구간의 KTX열차(KTX-5) 주행시 발생하는 처짐을 측정한 결과 최대 처짐은 선로건설기준 허용치 47.1mm(L/1700)보다 작은 0.815mm(Dis 8~Dis 12 서울 → 부산 294 km/hr)로 측정되었다.

주행속도에 따른 각 센서별 최대 처짐은 그림7.과 같고, 처짐이력곡선의 일례는 그림8.과 같다.

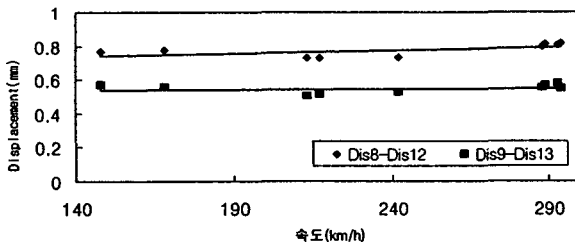


그림7. 주행속도별 최대 처짐

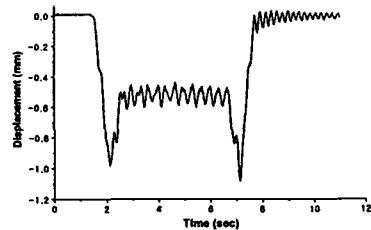


그림8. 처짐이력곡선의 일례

(4) 상판의 면틀림

4경간 연속구간에 KTX열차 주행시 발생하는 상판의 면틀림을 측정하기 위해 내·외측경간 중앙부 하면에 변위계를 설치하여 상대 변위량을 측정하였다. 이 상대 변위량을 각각 종방향 3m, 횡방향 1m에 대한 상판의 면틀림으로 환산한 결과 최대값은 외측경간 0.072mm(Dis8~Dis9, 서울→부산, 288km/hr)로 선로건설기준치($\leq 0.4\text{mm/m}$ (횡)/3m(종))보다 작은 것으로 확인되었다.

4경간 연속구간의 각 센서별 최대 면틀림은 그림9와 같고, 면틀림이력곡선의 일례는 그림10과 같다.

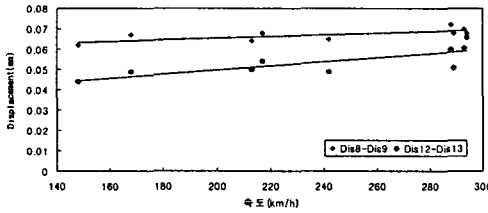


그림9. 주행속도별 최대 면틀림

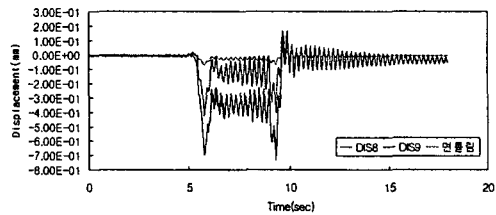


그림10. 면틀림 이력곡선의 일례

5. 경간별 성능시험결과

5.1 상판가속도

PSC BOX연속지지형식별 상판가속도를 분석한 결과는 도표 3, 그림 11과 같다. 연속지지형식에 따른 상판가속도 분석결과 본 연구대상 교량구조물은 모두 열차운행 안전성 측면에서 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 판단되며 단경간일때 상판가속도가 가장 큰 값을 보이고 있다.

5.2 단부꺾임각

PSC BOX 연속지지형식별 단부꺾임각을 분석한 결과는 도표 4, 그림 12와 같다. 연속지지형식에 따른 단부꺾임각 분석결과 본 연구대상 교량구조물은 모두 열차운행 안전성 확보 측면에서 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 판단되며, 단경간일때 단부꺾임각이 가장 큰 값을 보이고 있다.

도표 3. 구조형식별 상판가속도 측정결과

상부구조형식		주행속도 (km/hr)	상판 가속도(g)	선로건설 기준(g)
PSC BOX	단경간	207	0.132	0.35
	2경간	162	0.085	0.35
	3경간	147	0.115	0.35
	4경간	255	0.097	0.35

도표 4. 구조형식별 단부꺾임각 측정결과

상부구조형식		주행속도 (km/hr)	단부꺾임각 ($\times 10^{-5}$ rad)	선로건설기준 ($\times 10^{-5}$ rad)
PSC BOX	단경간	252	13.470	50
	2경간	99	13.161	50
	3경간	98	10.613	50
	4경간	289	10.640	50

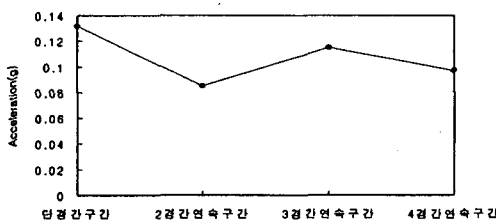


그림11. 구조형식별 상판가속도 측정결과

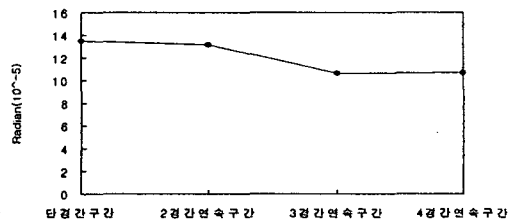


그림12. 구조형식별 단부꺾임각 측정결과

5.3 중앙부 처짐

PSC BOX 연속지지형식별 중앙부 처짐을 분석한 결과는 도표 5, 그림13.과 같다. 연속지지형식에 따른 중앙부 처짐 분석결과 본 연구대상 교량구조물은 모두 열차운행 승차감 확보 측면에서 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 판단되며, 단경간일때 중앙부 처짐이 가장 큰 값을 보이고 있다.

5.4 상판의 면틀림

PSC BOX 연속지지형식별 상판의 면틀림을 분석한 결과는 도표 6, 그림14.와 같다. 연속지지형식에 따른 면틀림 분석결과 본 연구대상 교량구조물은 모두 열차운행 안전성 확보 측면에서 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 판단되며, 단경간일때 상판의 면틀림이 가장 큰 값을 보이고 있다.

도표 5. 구조형식별 중앙부 처짐 측정결과

상부구조형식	주행속도 (km/hr)	최대 처짐 (mm)	선로건설기준 (mm)
PSC BOX	단경간	193	23.5
	2경간	99	23.5
	3경간	176	47.1
	4경간	294	47.1

도표 6. 구조형식별 상판의 최대 면틀림 측정결과

상부구조형식	주행속도 (km/hr)	최대 면틀림 (mm)	선로건설기준 (mm)
PSC BOX	단경간	223	0.4
	2경간	191	0.4
	3경간	168	0.4
	4경간	288	0.4

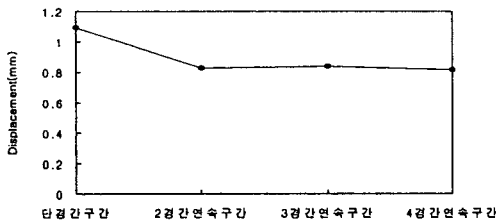


그림13. 구조형식별 중앙부 처짐 측정결과

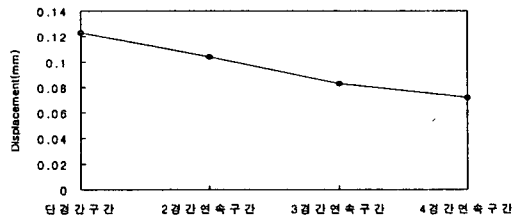


그림14. 구조형식별 상판의 최대 면틀림 측정결과

6. 결론

본 연구에서는 시운전구간내에 가설된 PSC BOX 교량구조물중 가장 대표성이 있는 교량들에 대해 KTX 고속열차가 무작위 통과시 발생하는 진동 및 변위응답을 측정·분석하고 이를 선로건설기준과 비교하여 대상구조물들이 충분한 성능을 확보하고 있는지 여부를 확인해 보았으며, 본 연구로부터 도출된 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 연구대상 교량구조물들에 대해 측정된 진동가속도, 단부꺾임각, 처짐, 면틀림 등을 선로건설기준과 비교한 결과 대상구조물들은 모두 열차운행안전성 및 승차감확보 측면에서 충분한 여유를 갖고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 진동가속도, 단부꺾임각, 처짐, 면틀림 등에 대한 항목에서 속도증가에 따른 영향은 거의 나타나지 않고 있으며, 지지형식이 단경간일때 모든 성능평가 항목에 대해 가장 큰 값을 보이고 있다.

참고문헌

1. 고속전철사업기획단(1991), "고속철도 콘크리트 구조물(RC,PSC)설계 표준시방서 해설(안)"
2. DE-Consult(1999), "On-Line Test", Korean Railroad Reserch Institute
3. 松浦章夫(1976), "高速鐵道における橋桁の動的舉動に関する研究", 日本土木學會 第256号
4. 한국철도기술연구원(2002) "시운전시 궤도·노반시설물의 성능검증"